



L'Observatoire Pierre Auger à la quête des énergies extrêmes

C. Lachaud, T. Beau, E. Armengaud

► To cite this version:

C. Lachaud, T. Beau, E. Armengaud. L'Observatoire Pierre Auger à la quête des énergies extrêmes. Images de la Physique, 2006, pp.35-40. in2p3-00179279

HAL Id: in2p3-00179279

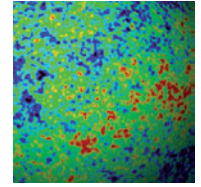
<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00179279>

Submitted on 15 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'Observatoire Pierre Auger à la quête des énergies extrêmes



L'Observatoire Pierre Auger est actuellement en fin de construction sur un plateau de la pampa argentine. C'est le plus grand détecteur jamais construit au monde puisqu'il couvrira à terme une surface de 3 000 km². Son objectif est de mesurer avec une précision et une statistique inégalées les caractéristiques des particules les plus énergétiques connues dans l'univers : les rayons cosmiques d'ultra haute énergie de 10²⁰ eV.

L'étude du rayonnement cosmique a marqué le début de la physique des particules lors de la première moitié du XX^e siècle en permettant l'observation de particules nouvelles ; celles-ci sont créées lors de l'interaction de particules cosmiques de haute énergie avec l'atmosphère terrestre. Plus tard, à partir des années 1950, les accélérateurs de particules sont devenus suffisamment puissants pour pouvoir prendre le relais en tant que « laboratoires » des particules élémentaires.

L'étude du rayonnement cosmique, bien qu'alors marginalisée, a cependant été poursuivie. Il y a environ 40 ans, l'expérience Volcano Ranch (Nouveau-Mexique, Etats-Unis) a observé le premier rayon cosmique d'énergie supérieure à 10²⁰ eV. Ce chiffre a de quoi donner le vertige. En effet, il représente une énergie macroscopique de 16 J pour une simple particule. Pour fixer les ordres de grandeur, l'eV (électron-volt) est l'échelle d'énergie des électrons du cortège atomique, le MeV (10⁶ eV) celle des interactions nucléaires, et le TeV (10¹² eV) est l'échelle des plus grandes énergies accessibles actuellement sur les accélérateurs de particules... ce qui reste encore de nombreux ordres de grandeur en dessous de 10²⁰ eV.

L'existence même de particules dotées d'une telle énergie pose des problèmes théoriques importants : comment et où sont générées des particules à de telles énergies ? Comment se propagent-elles dans l'espace ?

Depuis les années 1960, de nombreuses expériences ont vu le jour, mais l'étude des rayons cosmiques aux énergies les plus élevées reste délicate à cause, entre autres, de leur très faible flux : la **figure 1** montre que le spectre des rayons cosmiques suit une loi de puissance (à peu près proportionnel à $E^{-2,7}$), avec quelques changements subtils d'indice spectral au niveau du « genou » et de la « cheville » ; en conséquence le flux

des rayons cosmiques vers 10²⁰ eV est seulement de l'ordre d'une particule par km² par siècle.

Quelles peuvent être les sources astrophysiques capables de produire des particules aussi énergétiques ? On connaît des mécanismes pour accélérer des particules chargées au sein de milieux magnétisés, jusqu'à des énergies élevées dans les objets les plus violents de l'univers (noyaux actifs de galaxies, sursauts gamma). Néanmoins l'énergie maximale que peuvent atteindre des rayons cosmiques dans ces différents types d'objets est mal connue, si bien que l'on ne sait pas à l'heure actuelle

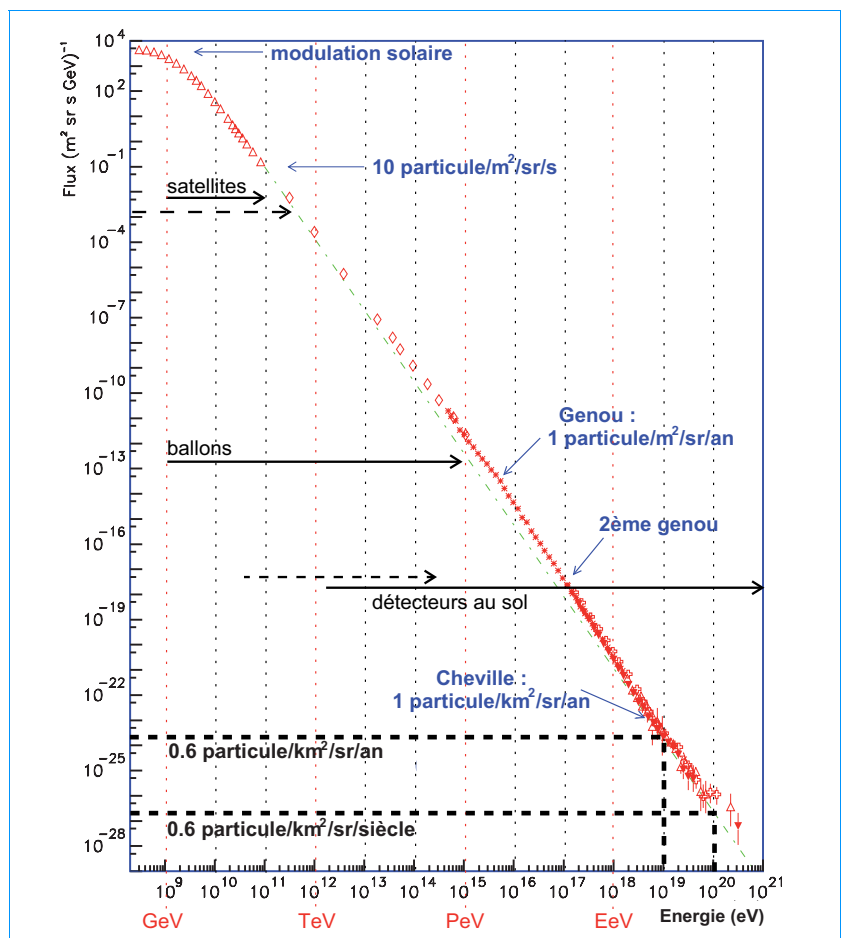


Figure 1 – Le spectre observé des rayons cosmiques s'étend sur 10 ordres de grandeur en énergie et 32 ordres de grandeur en flux.



Encadré 1

Etat des connaissances avant l'observatoire Pierre Auger

Les deux expériences les plus récentes utilisant des techniques radicalement différentes et mesurent des spectres en désaccord : le spectre mesuré par AGASA (pour Akeno Giant Air Shower Array, détecteur à scintillateurs au sol installé à Akeno au Japon) est plus élevé que celui d'HiRes (téléscopes fluorescence installés dans l'Utah aux Etats-Unis). Cette différence est probablement due en grande partie à des calibrations en énergie différentes des événements reconstruits par ces deux expériences. Par ailleurs, mise à part cette différence dans la normalisation du spectre, aux plus hautes énergies l'expérience HiRes tend à détecter la coupure GZK contrairement à AGASA. Mais à ces énergies la statistique reste trop faible pour apporter des conclusions fiables.

Notons enfin que si la distribution sur le ciel des rayons cosmiques est isotrope à 10^{19} eV, l'expérience AGASA semble observer une accumulation d'événements dans quelques directions privilégiées du ciel au-delà de $10^{19,6}$ eV. Ce signal, dit de « clustering », reste néanmoins statistiquement incertain.

On le voit, la situation est confuse sur l'ensemble des observables accumulées concernant les rayons cosmiques aux plus hautes énergies.

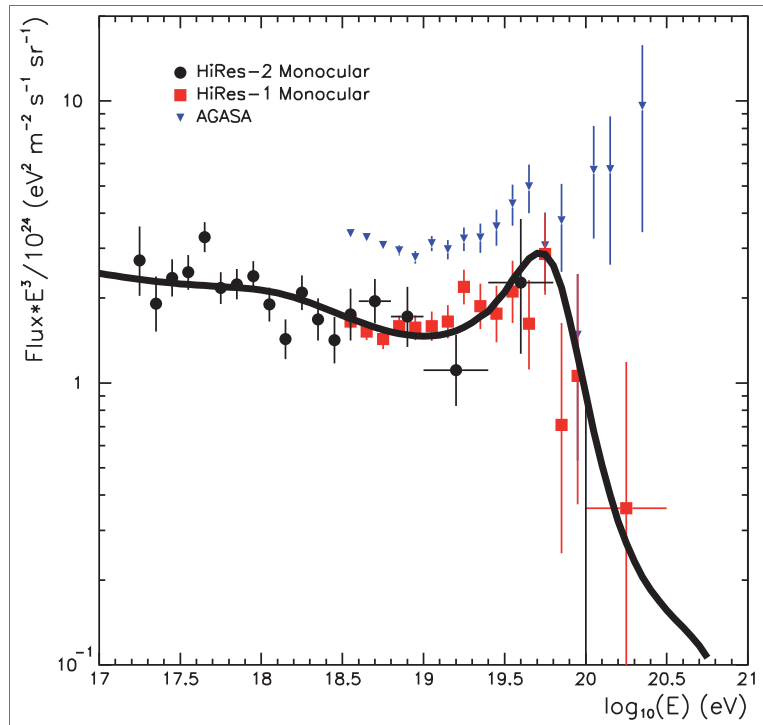


Figure 1 – Le spectre redressé (multiplié par E^3) mesuré par AGASA et HiRes. Un modèle de sources prenant en compte la coupure GZK est « ajusté » au spectre mesuré par HiRes.

quels sont les accélérateurs des rayons cosmiques observés, ni même si les mécanismes d'accélération imaginés sont vraiment responsables de l'existence de ces particules d'énergie extrême. Il est néanmoins vraisemblable qu'à ces énergies, les sources des rayons cosmiques soient extragalactiques. En effet, nous ne connaissons pas de sources dans notre galaxie susceptibles d'être classées comme sites accélérateurs, et le champ magnétique de la Galaxie n'est pas suffisant pour « retenir » des particules aussi énergétiques.

Entre leurs sources extragalactiques et la Terre, les rayons cosmiques sont défléchis par des champs magnétiques astrophysiques, et surtout ils interagissent avec les fonds diffus de photons de basse énergie qui existent dans l'univers (essentiellement le fond diffus micro-ondes à 2,73 K¹). La photo-production de pions (particule hadronique de la famille des mésons, constituée d'une paire quark-antiquark) sur ce fond doit entraîner, pour des énergies supérieures à environ $10^{19,6}$ eV (seuil de la réaction $p + \gamma \rightarrow p + \pi^0$, pour des photons du fond à 2,73 K d'énergie $\varepsilon_\gamma \sim 10^{-3}$ eV), une chute brutale du flux des rayons cosmiques observés sur Terre : il s'agit de la coupure dite GZK (du nom des physiciens GREISEN, ZATSEPIN et KUZMIN qui ont prédit cet effet). Quant aux déflexions, elles tendent à rendre isotrope la

distribution sur le ciel des rayons cosmiques, ce qui peut éventuellement empêcher l'observation « directe » des sources de ces particules.

Le fait que les sources des rayons cosmiques à ces énergies restent inconnues, que certaines expériences aient mesuré un spectre en énergie qui tende à être en contradiction avec la coupure GZK prédite (voir [encadré 1](#)) et que les énergies en jeu soient si élevées a suscité le développement d'un certain nombre de modèles alternatifs pour expliquer l'origine de ces particules. Ainsi, le flux des particules observées pourrait être dû à la désintégration de particules supermassives stables situées dans le halo de notre galaxie, et qui constitueraient la fameuse matière noire.

Plusieurs décennies après la découverte de ces particules, le mystère de leur origine reste donc entier.

Un observatoire pas comme les autres

La détection des rayons cosmiques à ces énergies est dite indirecte : on observe en fait les grandes gerbes de particules secondaires qu'ils engendrent dans l'atmosphère. Deux techniques sont actuellement opérationnelles pour détecter ces gerbes (voir [encadré 2](#)).

1. Voir l'article de F.-X. Désert sur Archeops en page 30.



Encadré 2

Les grandes gerbes de l'air

L'observation directe de rayons cosmiques n'est possible qu'à faible énergie ($< 10^{14}$ eV), lorsque le flux est encore raisonnable, c'est-à-dire quelques particules par mètre carré par jour. Cette observation directe s'effectue alors par satellite ou ballon.

En revanche, à plus haute énergie, le flux est extrêmement faible (quelques particules par kilomètre carré et par siècle vers 10^{20} eV). Cela nécessite des surfaces collectrices immenses qui ne peuvent être réalisées que sur Terre. On utilise pour cela l'atmosphère de la Terre comme volume de détection, l'atmosphère jouant alors le rôle de calorimètre. Le rayon cosmique primaire interagit dans la haute atmosphère, créant des particules secondaires, elles-mêmes à haute énergie. Ces dernières ré-interagissent engendrant une cascade de particules. De cette façon, un rayon primaire engendre une gerbe de quelques dizaines de milliards de particules, qui constituent les grandes gerbes de l'air. Pour fixer les idées, au niveau du sol, une gerbe de 10^{19} eV contient approximativement 5 milliards de particules, à raison d'environ 90 % de photons, 10 % d'électrons-positons et 1 % de muons.

Deux stratégies de détection sont opérationnelles actuellement : enregistrer les particules arrivant au sol sur une large surface (détection au sol) ou bien observer le développement de la gerbe dans l'atmosphère, ce développement s'accompagnant d'une fluorescence des molécules d'azote de l'air (détection par fluorescence).

Suivant la profondeur à laquelle a lieu la première interaction entre atmosphère et rayon cosmique primaire, la gerbe engendrée aura des propriétés différentes. On distingue ainsi des gerbes dites âgées et des gerbes dites jeunes. Les gerbes jeunes se développent bas dans l'atmosphère : le maximum de développement (profondeur d'atmosphère à laquelle le nombre de particules est le

plus grand) est très proche du sol pour de telles gerbes, et le réseau de surface mesure surtout la composante électromagnétique de la gerbe. Au contraire, les gerbes plus âgées ont traversé une plus grande épaisseur d'atmosphère et ont une composition au sol différente.

On peut exploiter ces différences pour estimer la nature des rayons cosmiques primaires engendrant les gerbes : un noyau lourd comme le fer aura tendance à interagir plus tôt dans l'atmosphère qu'un proton, et beaucoup plus tôt qu'un photon. Ainsi, en mesurant des grandeurs telles que la profondeur du maximum de développement de la gerbe (avec le détecteur de fluorescence), ou une observable liée à sa teneur en muons au niveau du sol (avec le détecteur de surface), on peut en théorie distinguer la présence d'éventuels photons, voire distinguer les protons du fer parmi les rayons cosmiques primaires.

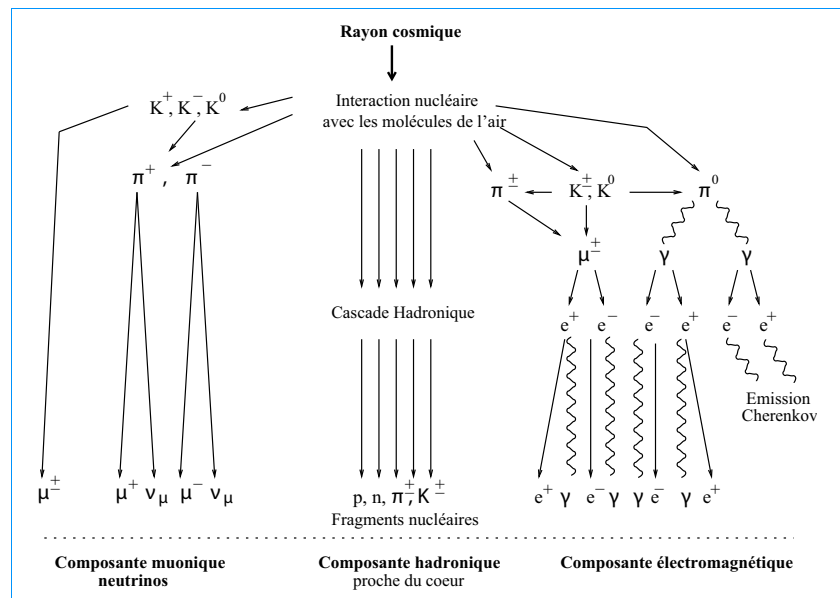


Figure 1 – Description schématique d'une grande gerbe atmosphérique engendrée par un rayon cosmique. Le détecteur de fluorescence mesure le profil longitudinal de la composante électromagnétique. Les cuves au sol sont, elles, sensibles à la fois aux composantes muonique et « électromagnétique ».

La détection au sol consiste à mesurer le flux de particules de la cascade à l'aide de détecteurs de particules formant un grand réseau, de sorte que la coïncidence temporelle entre les signaux de plusieurs détecteurs proches signe la détection d'une grande gerbe atmosphérique. La détection par fluorescence, quant à elle, utilise le fait qu'une gerbe de particules excite sur son passage les molécules de diazote de l'air qui se dés excitent en émettant une brève lumière de fluorescence dans l'ultra-violet, détectable à l'aide de télescopes à grand champ lors des nuits claires et sans Lune ; ainsi ces télescopes ne peuvent fonctionner qu'environ 10 % du temps.

Nous avons évoqué la discordance des résultats entre AGASA et HiRes dans l'encadré 1 ; ces deux

expériences utilisaient indépendamment ces deux techniques de détection. Il est donc fortement possible que la différence entre les résultats de ces deux détecteurs soit due à la non maîtrise des erreurs systématiques associées à l'une ou l'autre de ces méthodes (voire aux deux).

L'Observatoire Pierre Auger a été conçu afin d'observer les rayons cosmiques aux plus hautes énergies avec, d'une part, une statistique inégalée et d'autre part, le meilleur contrôle possible des erreurs systématiques. C'est donc un détecteur qui étudie les gerbes atmosphériques avec les deux techniques citées ci-dessus et dont la surface de collection est bien plus grande que celle des détecteurs précédents.

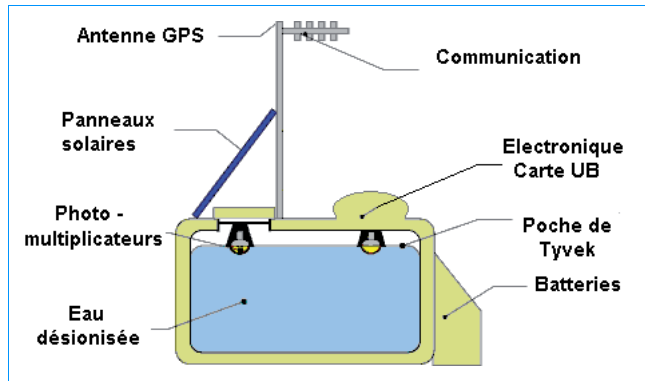


Figure 2 – Schéma d'une cuve de l'Observatoire Pierre Auger.

Le site de l'observatoire, en Argentine dans la province de Mendoza, a été choisi en particulier à cause de certaines contraintes techniques. Une grande surface plane d'altitude moyenne (1 400 m) est nécessaire pour optimiser la qualité de reconstruction des gerbes ; le ciel doit être le plus pur et dégagé possible pour les mesures de fluorescence.

Le détecteur de surface est composé de 1 600 cuves individuelles et autonomes (voir [figure 2](#)) réparties selon un maillage triangulaire de pas 1,5 km couvrant une superficie de 3 000 km² (voir [figure 4](#)). Elles sont munies de panneaux solaires et de batteries pour l'alimentation en énergie, un GPS permet d'atteindre une résolution temporelle de 8 nanosecondes et les communications avec le système central d'acquisition se font par ondes radio. Le milieu détecteur est constitué de 12 m³ d'eau ultra pure et utilise l'effet Cerenkov pour la détection : les particules chargées de la gerbe, de vitesse supérieure à c/n où n est l'indice de réfraction de l'eau, émettent des photons en traversant la cuve, qui sont alors réfléchis sur ses parois tapissées de Tyvek (pour une meilleure diffusion) et détectés par trois photomultiplicateurs de 9 pouces.

Lorsqu'une gerbe atteint le sol, elle est détectée par le réseau de surface. L'ordre des temps d'arrivée des signaux de la gerbe dans les différentes cuves permet d'estimer la direction d'arrivée sur le ciel du rayon cosmique primaire qui a engendré la gerbe, avec une précision de l'ordre de 1° (la résolution angulaire dépend essentiellement de la résolution temporelle des cuves). On peut aussi reconstruire le point d'impact central de la gerbe au sol (le « cœur » de la gerbe est connu à 50 m près) ; l'amplitude du signal dans les cuves en fonction de la distance au cœur de gerbe fournit en particulier une estimation du signal à 1 000 m, noté $S(1000)$; cette

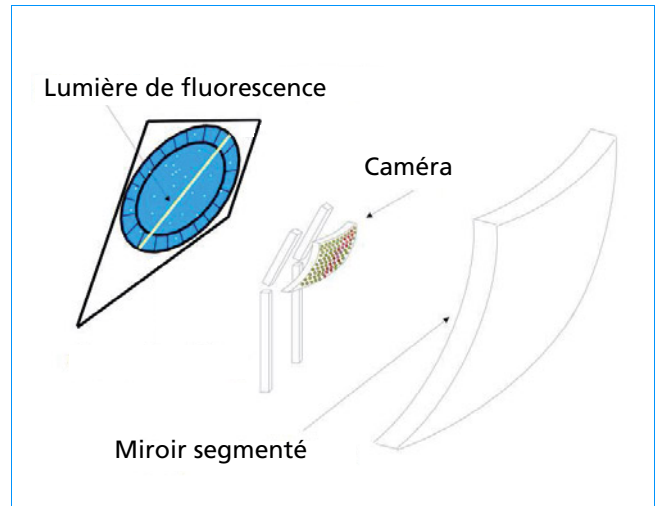


Figure 3 – Principe de fonctionnement du détecteur de fluorescence.

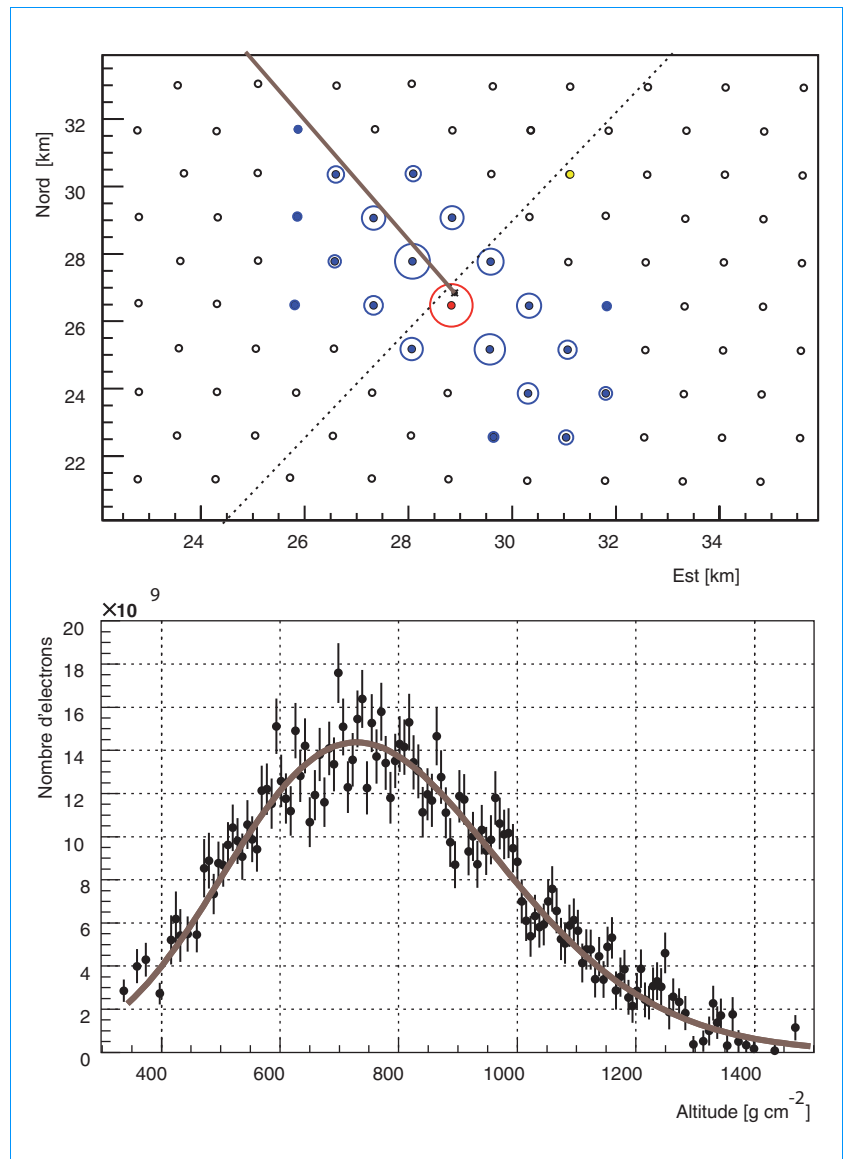


Figure 4 – Un événement hybride : en haut, la carte des cuves ayant détecté la gerbe (la taille des cercles est liée au signal enregistré) ; en bas, le profil longitudinal reconstruit par un détecteur de fluorescence.



grandeur permet ensuite d'estimer l'énergie de la particule primaire incidente.

Le détecteur de fluorescence est, quant à lui, localisé sur 4 sites en bordure du réseau, chaque site comprenant 6 télescopes à champ large. Chaque télescope est constitué d'un filtre qui transmet les ultra-violets (la lumière de fluorescence est émise dans cette bande de longueur d'onde), d'un miroir segmenté et d'une caméra équipée de 440 photomultiplicateurs couplés à une électronique rapide (voir [figure 3](#)). L'information en temps et l'intensité du signal reçu par les photomultiplicateurs permettent de reconstruire le profil longitudinal de la gerbe, c'est-à-dire le nombre d'électrons dans la gerbe en fonction de l'altitude (on parle plutôt de la profondeur dans l'atmosphère car c'est la quantité de matière traversée qui compte).

À ces détecteurs de fluorescence est couplé un dispositif complexe d'analyse en temps réel de l'état de l'atmosphère (LIDAR, ballons-sondes) nécessaire à la reconstruction correcte des propriétés de la gerbe incidente.

Lors des 10 % du temps d'acquisition pendant lesquels le détecteur de fluorescence fonctionne, on peut effectuer une « reconstruction hybride » (voir [figure 4](#)). Le signal de fluorescence, vu par un ou plusieurs télescope(s), combiné à la mesure du temps d'arrivée de la gerbe au sol par le détecteur de surface, fournit une mesure particulièrement précise de la direction d'arrivée et du cœur de la gerbe.

La difficulté des études effectuées avec le détecteur de surface seul tient au fait que la conversion entre signal dans les cuves et énergie du primaire ne peut être obtenue qu'avec des simulations : simulations des détecteurs et simulations des grandes gerbes atmosphériques. Cela est particulièrement problématique car les interactions qui se produisent au début du développement de la gerbe ont lieu à des énergies inaccessibles en accélérateur : leur modélisation (sections efficaces et multiplicité des interactions) repose donc sur des extrapolations non vérifiées des mesures faites à beaucoup plus basse énergie. En pratique, l'énergie reconstruite d'un rayon cosmique varie significativement en fonction du modèle d'interaction utilisé.

L'estimation de l'énergie du primaire avec le détecteur de fluorescence ne souffre pas de ce problème, car la conversion entre le profil longitudinal de la gerbe et l'énergie ne dépend que très peu des simulations. Dans ce cas, l'atmosphère joue le rôle d'un calorimètre et le nombre de photons de fluorescence constitue, quel que soit le modèle de l'interaction primaire, une bonne image de l'énergie du cosmique incident. Cependant, la mesure de l'énergie nécessite un bon contrôle des propriétés locales de l'atmosphère d'une part, et d'autre part la maîtrise du rendement de fluorescence des molécules de l'air, lequel n'est connu qu'à environ 15 % près, engendrant une erreur systématique non négligeable. Des mesures en laboratoire de ce rendement devraient ainsi permettre une réduction certaine de cette erreur

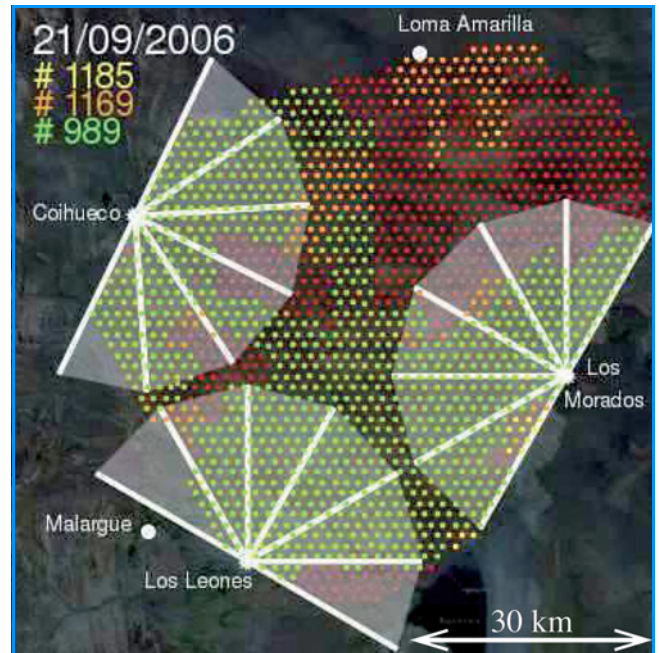


Figure 5 – Carte de l'Observatoire. Les zones blanches représentent le champ de vue des télescopes à fluorescence. Chaque point représente une cuve : en rouge les cuves manquantes, en jaune les cuves déposées, en orange les cuves remplies d'eau, en vert les cuves en fonctionnement au 21/09/2006.

systématique dans un futur très proche. De plus, l'estimation du spectre des rayons cosmiques avec un détecteur de fluorescence seul reste délicate car le spectre est obtenu en comptant le nombre de gerbes détectées et en divisant ce nombre par la surface effective, ou acceptance, du détecteur. Pour le détecteur de surface, l'acceptance est obtenue directement à partir de la surface géométrique couverte par le réseau, mais pour le détecteur de fluorescence, elle dépend des conditions atmosphériques, de l'énergie du primaire (plus une gerbe émet une lumière de fluorescence intense, plus elle sera visible de loin) *etc*.

En combinant les mesures des détecteurs de surface et de fluorescence, l'Observatoire Auger peut contourner ces problèmes propres à chacune des techniques de détection et statuer sur la discordance entre AGASA et HiRes.

Le déploiement à moindre frais de 1 600 cuves de 12 tonnes d'eau sur un vaste plateau n'est pas une mince affaire : commencée en janvier 2004, l'installation des cuves devrait s'achever en 2007. Environ les 2/3 du détecteur de surface et 3 sites de fluorescence sur 4 sont d'ores et déjà en fonctionnement (fin 2006), assurant dès maintenant un flot de données inégalé ([figure 5](#)).

Les premiers résultats et les perspectives

La construction d'un tel observatoire prend du temps ; bien qu'elle ne soit pas encore achevée, les données déjà accumulées permettent d'obtenir de premiers résultats préliminaires pertinents.

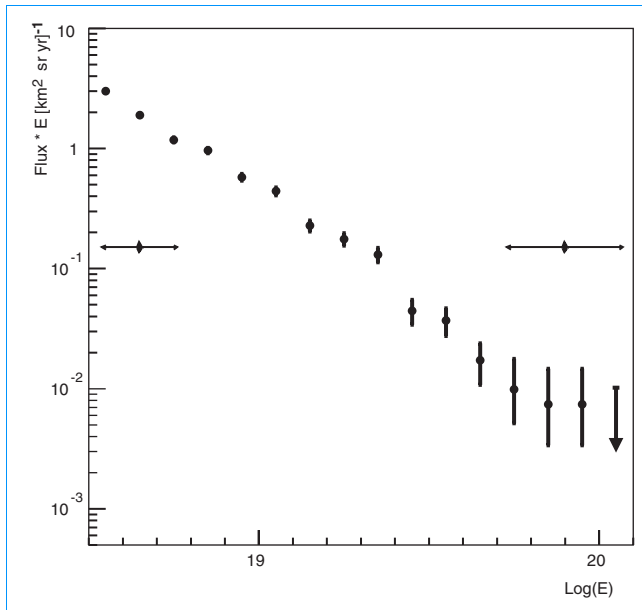


Figure 6 – Le spectre présenté à l'ICRC 2005 (International Cosmic Ray Conference) par l'Observatoire Auger (multiplié par E). Les erreurs statistiques sont représentées verticalement sur les points du spectre ; les erreurs systématiques sont montrées horizontalement sur les côtés.

Un premier spectre « hybride » a ainsi pu être obtenu ([figure 6](#)). La statistique est encore insuffisante pour pouvoir conclure sur la présence ou l'absence de la coupure GZK mais le plus intéressant est la méthode qui a permis d'obtenir ce spectre ; il a été obtenu avec les gerbes atmosphériques détectées par le réseau de surface mais en utilisant les données du détecteur de fluorescence pour calibrer la relation donnant l'énergie du rayon cosmique incident en fonction du signal dans les cuves. Ainsi, on évite les inconvénients inhérents à chacune des méthodes de détection lorsqu'elles sont utilisées séparément, à savoir la faible statistique de la fluorescence et la forte dépendance aux modèles des détecteurs de surface. L'Observatoire Auger va ainsi pouvoir rapidement conclure sur la forme du spectre des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie et sur l'existence ou non de l'effet GZK.

Nous avons vu (voir [encadré 2](#)) que les grandes gerbes atmosphériques n'ont pas les mêmes propriétés suivant la nature du rayon cosmique primaire qui les génère. Il est en particulier relativement facile de discriminer entre une gerbe engendrée par un photon ou bien un noyau, en utilisant la profondeur dans l'atmosphère du maximum de développement de cette gerbe, qui est mesurée avec le détecteur de fluorescence. À 10^{19} eV, les gerbes observées ont un profil qui correspond bien à des noyaux (protons ou bien noyaux plus lourds), et on a ainsi pu établir une limite supérieure de 27 % sur la fraction des photons de ultra haute énergie dans le rayonnement cosmique. Là encore, les perspectives sont excellentes et il devrait être possible d'établir aussi des limites sur le flux ou, mieux encore, de détecter des neutrinos. La mise en évidence éventuelle de rayons cosmiques de type photons ou neutrinos favori-

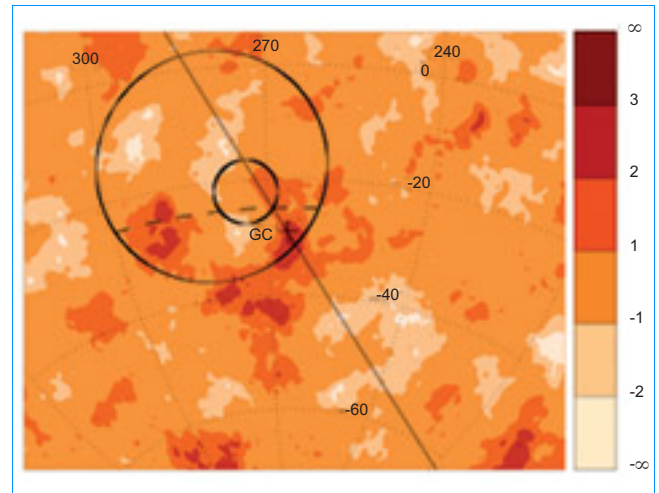


Figure 7 – Carte du ciel (en échelle de significativité statistique) au voisinage du centre galactique vue par l'Observatoire Auger autour de 10^{18} eV. Les deux cercles indiquent des régions où de précédentes expériences (AGASA et SUGAR) avaient annoncé l'existence possible d'une source.

serait les modèles « exotiques » qui ont été mis en avant pour expliquer l'origine des rayons cosmiques.

Enfin, les directions d'arrivée des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie sont analysées avec attention. On pense en effet qu'aux plus hautes énergies, d'une part seules les sources proches contribuent au flux observé à cause de l'effet GZK et, d'autre part, les déflexions dues aux champs magnétiques astrophysiques deviennent suffisamment faibles² pour permettre l'identification des sources. Cela donnerait naissance à « l'astronomie des particules chargées » : pour la première fois, des particules autres que des photons permettraient d'observer directement des objets astrophysiques.

Pour l'instant, les données de l'Observatoire ont surtout permis d'exclure l'existence d'une éventuelle source de neutrons au voisinage du centre de la Galaxie à une énergie de 10^{18} eV, qui avait été suggérée suite à des mesures de l'expérience AGASA ([figure 7](#)).

La construction de l'Observatoire sera bientôt achevée. Une nouvelle fenêtre sur l'univers s'ouvrira alors avec l'étude de ces mystérieuses particules ultra-énergétiques.

POUR EN SAVOIR PLUS

Parizot (E.) et al., *Physique et astrophysique du rayonnement cosmique*. Ecole thématique du CNRS, Goutelas, 2003.

Nagano (M.), Watson (A.A.), *Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays*. Rev. Mod. Phys. 72, 2000, 689.

Sommers (P.), *First Estimate of the Primary Cosmic Ray Energy Spectrum above 3 EeV from the Pierre Auger Observatory*. Proc. ICRC, 2005.

2. Le rayon de Larmor d'une particule chargée relativiste est en effet proportionnel à son énergie.